

УДК 669.2.8:620.178.6

ВЛИЯНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНЫХ ФАКТОРОВ НА МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В.С. Савенко, А.Г. Силивонец, С.А. Ермоковец

Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина

INFLUENCE OF PONDEROMOTIVE FACTORS ON MICROSTRUCTURE CHARACTERISTICS OF MAGNESIUM DURING ELEKTROPLASTIC DEFORMATION

V.S. Savenko, A.G. Silivonec, S.A. Ermokovec

I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния импульсного тока плотностью 10^3 А/мм², длительностью 10^{-4} с и частотой 600–800 Гц на микроструктурные характеристики при реализации многоходовой электропластической прокатки магния. Рассмотрен вклад пондеромоторных факторов собственного магнитного и электрического полей на модификацию микроструктуры в условиях возбуждения электронной подсистемы металла при внешних электромагнитных воздействиях.

Ключевые слова: электропластическая деформация, пондеромоторное действие тока, пинч-эффект, скин-эффект, импульсный ток, собственное магнитное поле, вихревое электрическое поле, поле Холла, механическое давление, максимальная осевая сила.

The results of theoretical and experimental research of pulse current influence (density 10^3 A/mm², duration 10^{-4} s and frequency 600–800 Hz) on the microstructure of magnesium when implementing a multi-pass electroplastic rolling are presented. The contribution of ponderomotive factors of the own magnetic and electric fields to microstructure modification is examined in conditions of the metal electronic subsystem excitation by external electromagnetic influences.

Keywords: electroplastic deformation, ponderomotive action, pinch effect, skin effect, pulse current, magnetic field, electric field, Vortex field Hall, mechanical pressure, maximum axial force.

Введение

В настоящее время внимание многих исследователей обращено на рассмотрение электронно-дислокационных механизмов при модификации физических свойств материалов. Это вызвано тем, что у подавляющего большинства металлов пластические свойства реализуются путем эволюции совокупностей дислокаций при внешних энергетических воздействиях. Возникающий электропластический эффект (ЭПЭ) при действии одиночными импульсами тока во время деформации кристаллов растяжением и сжатием проявляется в скачкообразном удлинении образцов при прохождении импульса тока без какого-либо существенного теплового эффекта и тепловой дилатации. ЭПЭ обусловлен ускорением пластического течения металла потоком электронов проводимости, которые находятся в дрейфовом движении под влиянием электромагнитного поля, или действием «электронного ветра» внутри деформируемого металла, то есть помимо джоулевого эффекта, свободные электроны способны оказывать особое специфическое электропластическое действие на металл, находящийся под механическими напряжениями выше предела текучести [1]–[4].

Воздействие электромагнитными полями на деформируемое твердое тело, в частности, на металл во время обработки его давлением, относят к высокоэнергетическим воздействиям, хотя, как правило, они отличаются относительно низкими затратами энергии – не более 10^{-4} эВ в расчете на один атом, что на один-два порядка меньше затрат энергии на простое механическое деформирование (10^{-3} – 10^{-2} эВ) или на тепловое действие (10^{-2} эВ). В магнитном поле с индукцией $B = 1$ Тл приращение энергии на один атом составляет:

$$\Delta W = \mu_b B = 10^{-4} \text{ эВ},$$

в электрическом поле напряженностью $E = 1$ кВ/см:

$$\Delta W = eEa = 10^{-4} \text{ эВ},$$

в поле импульсного тока с плотностью $J_m = 10^3$ А/мм² и длительностью импульса $\tau = 100$ мкс:

$$\Delta W = J_m^2 \rho \tau a^3 = 10^{-4} \text{ эВ},$$

где μ_b – магнетрон Бора, e – элементарный заряд, ρ – удельное сопротивление, a – параметр кристаллической решетки.

Электропластичность обуславливает ряд факторов вторичного силового действия импульсного тока, которые влияют на пластическую деформацию металла, находящегося под механическим

напряжением выше предела текучести, таких как, пинч-эффект, возникающий под влиянием собственного магнитного поля тока и поляризации электронной подсистемы металла с созданием поперечного электрического поля Холла, которое препятствует дальнейшему сжатию электронной плазмы. При этом пинч-эффект создает ультразвуковую вибрацию остова кристаллической решетки и стимулирует пластичность металла, снижая его сопротивление деформированию. Механизм пинч-эффекта заключается в появлении вокруг образца с током кольцевых линий собственного магнитного поля (рисунок 0.1) и поперечного поля Холла, действующего на движущиеся заряды электронной плазмы (электроны проводимости) в поперечном направлении и смещающего их к оси проводника, обуславливая ультразвуковую вибрацию ионной решетки металла с частотой следования импульсов [5].

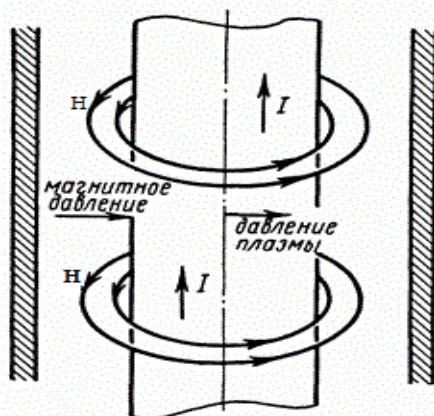


Рисунок 0.1 – Модель возникновения пинч-эффекта

Скин-эффект заключается в уменьшении амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется неравномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое проводника. Происхождение скин-эффекта объясняется тем, что под действием внешнего переменного поля в проводнике свободные электроны создают токи, поле которых компенсирует внешнее поле в объеме проводника.

Таким образом, при реализации явления электропластичности пондеромоторные факторы становятся особенно заметным на высоких частотах следования импульсов [4], [6], [7].

Следует отметить, что во время электропластической деформации, кроме вторичных пондеромоторных эффектов при пропускании импульса электрического тока через проводник, наблюдается термическое разупрочнение решетки, расчет которого, для рассматриваемых длительностей импульсов тока (10^{-4} – 10^{-5} с) свидетельствует о несущественности этого эффекта [8]–[9].

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований воздействия импульсного тока на реализацию электропластической деформации многоходовой прокатки магния, а также влияние пондеромоторных факторов собственного магнитного и электрического поля, характеристики микроструктуры образца в условиях возбуждения электронной подсистемы металла при внешних электромагнитных воздействиях.

1 Расчет параметров пинч- и скин-эффектов

Рассмотрим влияние пондеромоторных факторов – напряженности собственного магнитного поля, механического давления и осевой силы – для технологического процесса электропластической деформации магния, реализованной на промышленном прокатном стане многоходовой прокаткой для конечных геометрических размеров образца после 35 переходов: толщина – 1 мм, ширина – 4 мм. При реализации электропластической прокатки через зону деформации с помощью специальных контактов пропускали импульсы тока плотностью $J = 10^3$ А/мм², длительностью $\tau = 10^{-4}$ с и частотой следования импульсов $\omega = 600$ – 800 Гц.

На поверхности образца, напряженность собственного магнитного поля для последнего 35-го перехода, принимает значение [4]–[6]:

$$H_m = 0,2 \frac{I_a}{r} = 31,8 \cdot 10^3 \text{ А/м,}$$

где $I_a = jS$ – амплитудное значение силы тока в проводнике, $j = 10^3$ А/мм², $S = 4$ мм² – площадь поперечного сечения проводника, $r = 0,5$ мм – радиус образца.

Механическое давление, возникающее от сжатия электронной плазмы, равно:

$$P = \mu \frac{H_m^2}{8\pi} = 7,89 \cdot 10^{-3} \text{ Па,}$$

где P – механическое давление (Па), $\mu = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная проницаемость магния.

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены расчетные значения собственного магнитного поля тока H_m , а также механического давления P на поверхности образца магния.

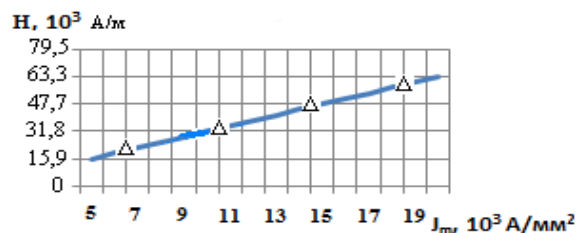


Рисунок 1.1 – Зависимость собственного магнитного поля тока H_m на поверхности образца магния от плотности тока J_m

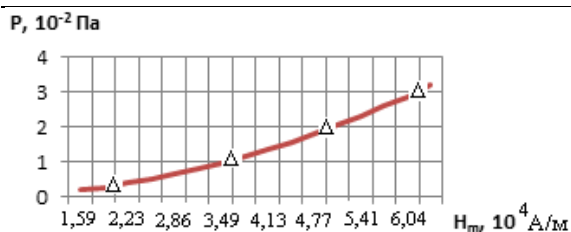


Рисунок 1.2 – Изменение механического давления P на поверхности образца магния при различных значениях собственного магнитного поля тока H_m

При этом максимальная осевая сила F_z , возникающая на последнем переходе и обуславливающая ультразвуковую вибрацию остова кристаллической решетки от пинч-действия тока, равна:

$$F_z = 2\nu PS = 1,71 \cdot 10^{-2} \text{ Н},$$

где $\nu = 0,27$ – коэффициент Пуассона, P – механическое давление, $S = 4 \text{ мм}^2$ – площадь сечения образца.

Важную роль в явлении электропластичности и возникновении вторичных пондеромоторных эффектов играет материал образца и его проводимость, а также скорость диффузии магнитного поля, которыми соответственно обуславливается пинч-эффект.

Величина пинч-эффекта также зависит от круговой частоты ω , добротности Q , которая должна быть небольшой. При $R \leq 0,1 \text{ Ом}$, $L \cong 10^{-7} \text{ Гн}$ и $C \cong 10^{-3} \text{ Ф}$, $\omega = 600 \div 800 \text{ Гц}$ и длительности импульса $\tau = 10^{-4} \text{ с}$ добротность составляет величину $Q \leq 0,1$.

Толщину скин-слоя δ для образца магния определяли из соотношения $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$, где μ – магнитная проницаемость магния, σ – удельная проводимость магния, ω – частота следования импульсов.

При частоте тока 600 Гц толщина скин-слоя в образце на последнем технологическом переходе равна $\delta = 1,081 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$, а при 800 Гц $\delta = 9,36 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$.

Очевидно, что при достаточно большой частоте ω толщина скин-слоя может быть очень малой, достигая значений менее 10 мкм при частотах порядка 800 Гц (рисунок 1.3).

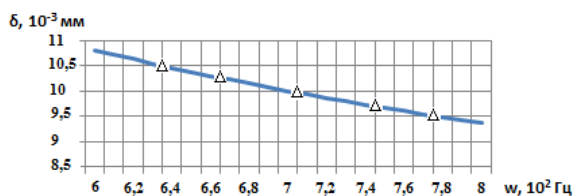


Рисунок 1.3 – Зависимость величины скин-слоя δ от круговой частоты ω

2 Морфологический анализ микроструктуры образцов магния

Рассмотрим влияние пондеромоторных факторов на изменение микроструктурных характеристик при реализации электропластической деформации многоходовой прокаткой магния.

Исследования проводили на образцах магния, один из которых подвергался многоходовой прокатке из 35 переходов в условиях электропластической деформации, а второй образец (контрольный) проходил прокатку без тока.

Микроструктуру образцов (рисунок 2.1) изучали с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455VP (CarlZeiss) в отраженных электронных лучах, ускоряющее напряжение составляло 20 кВ.

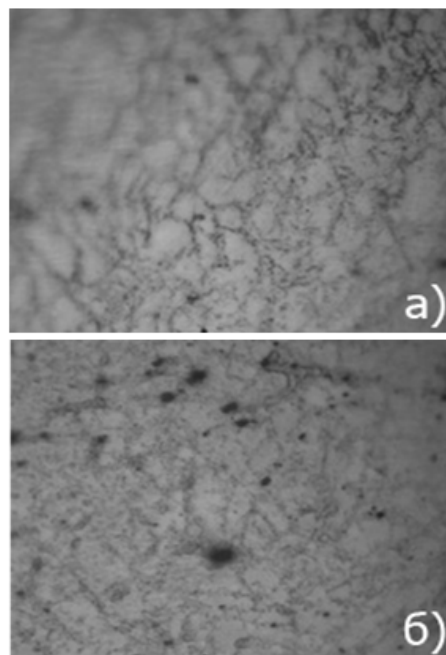


Рисунок 2.1 – Микроструктура образцов без тока (а) и с током (б) (100x)

Морфологический анализ изображения осуществляли на приборе «Пост микроконтроля МК-3» с помощью компьютерной программы Autoscan Objects, которая позволяет проводить их автоматическую классификацию по заданным параметрам с выделением гистограмм по классам и определением контроля физико-механических свойств материала (рисунок 2.2 (а, б)).

Деформационные характеристики образцов с током и без тока по различным параметрам показали существенную модификацию микроструктуры при внешних энергетических воздействиях в результате реализации электропластической деформации (таблица 2.1).

Площадь зерен рассчитывали методом трапезий путем проектирования отрезков, составляющих объект, на ось и подсчетом суммы разности площадей полученных фигур. Периметр зерен определяется простым суммированием длин

отрезков, составляющих контур объекта. Из морфологического анализа микроструктуры по параметрам площади и периметра видно существенное влияние импульсов тока, пропущенных через материал, нагруженный выше предела текучести, на деформационные процессы при прокатке магния в условиях электропластичности (рисунки 2.4, 2.5).

Таблица 2.1. – Деформационные характеристики образцов

Морфология образцов	Без тока (а)	С током (б)
Количество всех объектов	218	272
Сумма площадей всех объектов:	282.12 мкм ²	258.86 мкм ²
Обработанная площадь:	62.64%	57.48%

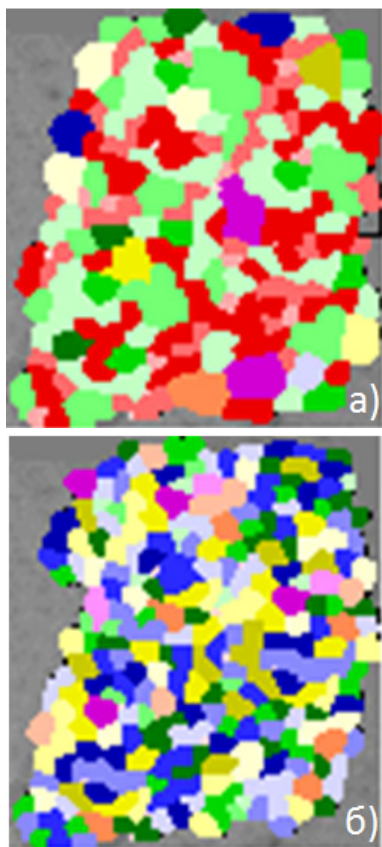


Рисунок 2.2 – Морфология микроструктуры образца без тока (а) и с током (б)

Из графиков видно, что при пропускании импульсов электрического тока через образец изменяется кинетика пластической деформации и физико-механические характеристики материала за счет пондеромоторных факторов, при этом микроструктура деформированного магния становится мелкозернистой с появлением зон рекристаллизации (размер зерна 1–3 мкм) и частичной аморфизацией за счет увеличения изотропности кристаллической решетки.

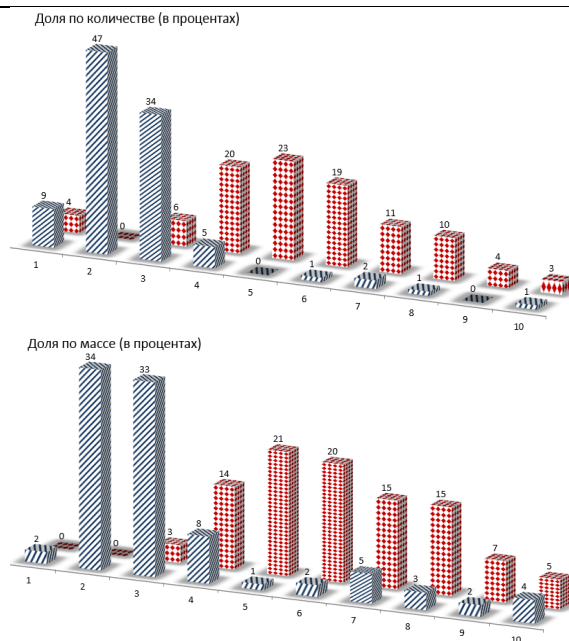


Рисунок 2.4 – Сравнительный график по параметру «площади зерен»

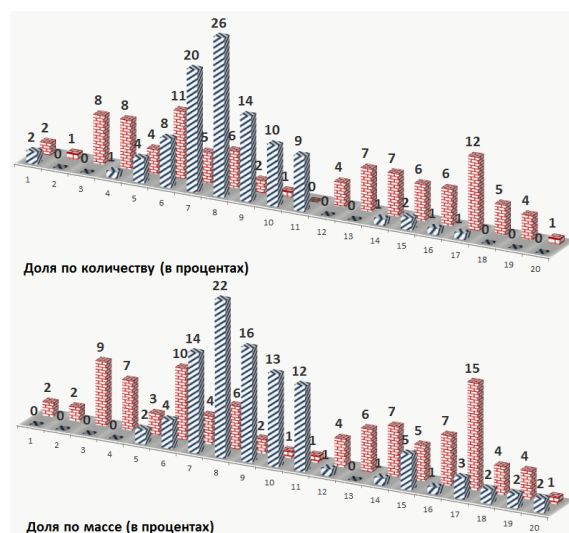


Рисунок 2.5 – Сравнительный график по параметру «периметр зерен»

Заключение

Для технологических процессов электропластической деформации металлов, особенно при их волочении и прокатке, необходимо учитывать условия возникновения пондеромоторных факторов с целью определения максимальных значений пинч- и скин-эффектов при одинаковых параметрах импульсного тока, а также их связь со скоростью диффузии магнитного поля в металл.

Импульсный ток, пропущенный через металл, нагруженный выше предела текучести, реализует явление электропластичности и вызывает, помимо электропластического действия, пондеромоторные эффекты, которые обуславливают

возникновение механических напряжений, возбуждение ультразвуковых колебаний ионного остова кристаллической решетки металла с периодичностью подачи импульсов тока за счет действия поперечного поля Холла.

При дополнительной деформации образца за счет пондеромоторных факторов магнитное поле диффундирует в кристалл, при этом скорость диффузии зависит как от проводимости металла, так и от частоты тока. Для достижения максимума пинч-эффекта необходимо выбирать такую частоту импульсов тока, при которой магнитное поле не успевает существенно проникнуть через поверхность образца. При одной и той же геометрии образцов пинч-эффект выражен сильнее на материале с более высокой электропроводностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рощупкин, А.М.* Физические основы электропластической деформации металлов / А.М. Рощупкин, И.Л. Батаронов // Изв. ВУЗов. Серия Физика. – 1996. – № 3. – С. 57–65.
2. *Рощупкин, А.М.* О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / А.М. Рощупкин, И.Л. Батаронов // Физика твердого тела. – 1988. – Т. 30. – № 11. – С. 3311–3316.

3. *Roschupkin, A.M.* Electric current effect on metal surface layers / A.M. Roschupkin, I.L. Bataronov, O.A. Troitskii, M.M. Moiseenko // Phys. Stat. sol (b). – 1989. – Vol. 151, № 1. – P. 121–126.

4. *Савенко, В.С.* Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий / В.С. Савенко // Монография. Издание 2-е дополненное и переработанное. – Мн.: БГАФК – 200. – 203 с.

5. *Арцимович, Л.А.* Пинч-эффект / Л.А. Арцимович. – В кн.: Элементарная физика плазмы. – 3-е изд. – М.: Атомиздат, 1969. – С. 151–158.

6. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы* / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.

7. *Савенко, В.С.* Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов / В.С. Савенко, О.А. Троицкий. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.

8. *Savenko, V.S.* Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields. / V.S. Savenko // Journal of Applied Physics. – 1999. – № 5. – P. 1–4.

9. *Электропластическая правка и прокатка стали* / В.С. Савенко [и др.] // Известия АНБ, Серия физико-технических наук. – 1994. – № 1. – С. 14–17.

Поступила в редакцию 24.02.16.